

SMART GRID СИСТЕМИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ SMART GRID SYSTEM AND TECHNOLOGY

УДК 621.31

С.П. Денисюк, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-6299-3680
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Р. Стшелецькі, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-9437-9450
Гданський університет технологій, Польща

ФОРМУВАННЯ СКЛАДОВИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА МЕРЕЖАМИ

Розглянуто особливості реалізації концепції Smart Grid в сучасних енергетичних системах і мережах з врахуванням драйверів сучасної енергетики, зокрема, Інтернет енергії, Інтернет речей, розосередженої генерації, розвитку клієнтських сервісів та агрегаторів попиту і пропозиції на електроенергію. Оцінено базові компоненти розвитку електроенергетики з врахуванням вимог енергетичного переходу, дигіталізації економіки, зокрема, бізнес-додатків та інформаційно-комунікаційних систем. Наведено елементи сучасної технологічної платформи Smart Grid. Дана оцінка особливостей формування інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та електричними мережами для окремих енергетичних компаній.

Детально розглянуто особливості побудови децентралізованих систем керування енергією (Distributed Energy Management System, DEMS). Особливості роботи DEMS проаналізовано на прикладі системи DEMS компанії Siemens. Розглянуто функції планування і функції керування DEMS. Показано, що керування DEMS забезпечують контроль і моніторинг потужності всіх генераторів електроенергії, обладнання зберігання і гнучким попитом, а також можливістю керування для підтримки узгодженого профілю обміну електроенергією.

Представлено основні функції системи керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS). Як складові клієнтоорієнтованої платформи керування розподільними електричними мережами проаналізовано системи керування, що розроблені компаніями Oracle, ETAP та Schneider Electric. Наведено характеристику окремих модулів ETAP ADMS та базових функцій SE ADMS, розроблених відповідно компаніями ETAP та Schneider Electric.

Ключові слова: Smart Grid, енергетичні системи, електричні мережі, інтелектуальне керування, децентралізовані системи керування енергією, системи керування розподілом електроенергії.

ВСТУП

Сьогодні у багатьох розвинених країнах світу реалізуються сценарії так званого енергетичного переходу, в рамках якого сучасна енергетика трансформується до клієнтоцентричних енергосистем [1–3, 6]. Здійснюється перехід від традиційних моделей до нових, що використовують значні обсяги розосередженої генерації (РГ), включаючи відновлювані джерела енергії (ВДЕ) та накопичувачі. Ринки стають децентралізованими, інфраструктура – інтелектуальною, а споживачі переходять до активних, просяюмських моделей поведінки.

Складовими діючою на сьогодні домінуючої енергетичної парадигми, що склалися в кінці 20-х роках ХХІ ст., є: домінування джерел електроенергії на основі вуглеводневого палива; великі вертикально інтегровані енергетичні компанії; централізовані електричні мережі; односпрямованість потоків електроенергії – від генератора до споживача; одночасність процесів виробництва та споживання електроенергії; широке використання органічного палива в промисловості та на транспорті [1 – 3, 6, 15]. Складові майбутньої (нової) енергетики, що зараз формуються: «чиста енергія» ВДЕ; глибока децентралізація виробництва енергії; зростання ролі електроенергії в структурі споживання паливно-енергетичних ресурсів; децентралізовані ринки, приватні інвестиції; інтелектуалізація базової інфраструктури, розвиток технологій Smart Grid; перехід споживачів до активних моделей поведінки; технології накопичення енергії; зростання ефективності використання енергії; зростання рівнів електрифікації промисловості та транспорту [2, 5, 8, 9, 13, 15]. Драйверами нових змін є технологічні досягнення в інших галузях, перш за все, у сферах передачі та обробки інформації, інформаційно-комунікаційних технології (ІКТ), силовій електроніки та сучасних методів і моделей керування великими системами.

© С.П. Денисюк, Р. Стшелецькі, 2019

Необхідно відзначити інтенсивне просування у процесі переходу до цифрової, а фактично – до інтелектуальної електроенергетики, яке здійснюється при активній підтримці держави в Європі, США, Японії, Кореї. Зокрема, на європейських ринках електроенергії запроваджуються нові правила, які сприятимуть подальшому залученню ВДЕ, зростанню конкуренції і гнучкості енергосистем, активізації участі споживачів та збільшенню інвестицій [1, 5–8, 21, 24].

Так, регламент ЄС, що встановлює модель ринку електроенергії (Electricity Market Design, EMD), був офіційно ухвалений у травні 2019 року. Перехід до ВДЕ та підвищення рівнів електрифікації є критично важливими, щоб досягти в Європі до 2050 року рівня вуглецевої нейтральності. В умовах нестабільного виробництва енергії необхідні гнучкі маневрені потужності для балансування енергосистеми. За досвідом найбільш розвинених енергосистем, потужність засобів балансування повинна становити 25–30% від встановленої потужності ВДЕ, що працюють у принципово новому режимі, який можна охарактеризувати як режим компенсації похибки прогнозування [21, 24]. Цей режим не пов'язаний з циклічністю добового споживання чи з аварійними ситуаціями в енергосистемі, а лише з непередбачуваністю відхилень фактичного виробництва сонячної та вітрової енергії від прогнозованих значень. Енергосистеми мають стати більш гнучкими з метою швидкого реагування на несподівані ситуації. На сьогодні можна виділити чотири типи джерел гнучкості [1, 6, 8, 21, 24]: генерація (ГЕС і маневрені ТЕС), мережеві рішення (інтерконектори для перетоків між країнами та концепції Smart Grid), гнучкість попиту (коли споживачі регулюють своє навантаження) і технології накопичення енергії (ГАЕС, батареї). Кожен з цих типів джерел гнучкості має свої переваги, тому найкращого результату можна досягти оптимальною комбінацією різних джерел.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА МЕРЕЖАМИ

Нові джерела енергії і необхідність покращення контролю за станом мереж призводять до необхідності формувати клієнтоорієнтовані енергетичні мережі, що має базуватися на такому явищі як дигіталізація [7 – 10]. Так, електромережеві компанії сьогодні стикаються з серйозними змінами в операційній роботі, що викликано стрімким зростанням числа розосереджених джерел енергії (Distributed energy resources, DER), таких як сонячні фотоелектричні панелі, накопичувачі енергії, електромобілі і підключені до мережі домашні пристрої [1, 10 – 16]. Ще однією причиною змін енергетичної інфраструктури є проблеми старіння і зносу мережевого господарства.

Дигіталізацію визначають важливою частиною архітектури четвертої промислової революції «Індустрії 4.0» (*нім.* – Industrie 4.0, *англ.* – Industry 4.0) [7 – 10]. Частиною цифрової економіки безумовно є цифрова енергетика. Очевидно, що в розумінні «цифрова енергетика» дигіталізація не тотожна автоматизації, не означає лише можливість оперувати великою кількістю даних. Більшість досліджень визначають дигіталізацію в енергетиці як новий формат комплексного керування роботою електроенергетичних систем, що забезпечує векторну оптимізацію технологічних і бізнес-процесів для досягнення цільового стану електроенергетики, реалізацію нових технологій економічної взаємодії суб'єктів галузі. При цьому актуальною постає задача інтеграції бізнес-додатків і технологічних інформаційно-комунікаційних систем, що дозволяє [1 – 3, 6, 17, 18]:

- 1) підвищити надійність мереж та якість обслуговування споживачів;
- 2) оптимізувати інвестиції в розвиток електричних мереж та підвищити віддачу від інвестиційних проектів за рахунок планування перспективного розвитку мережі з урахуванням;
- 3) оперативно формувати управлінську звітність у будь-якому розрізі на основі даних як бізнес-додатків, так і технологічних інформаційних систем, зокрема, оцінка ефективності інвестицій у нове обладнання та капітальне будівництво, у тому числі на основі зіставлення витрат (дані з бізнес-додатків) і кількісних індексів CAIDI, SAIDI, CAIFI, SAIFI тощо.

Як наслідок, побудова Smart Grid постає як складне завдання, що починається з детальної кількісної оцінки вимог до системи, визначення фактичних цілей і необхідних для їх досягнення рівнів функціонування, та супроводжується описом основних концепцій системи і використовуваного обладнання. На сьогодні власне розвиток енергетики має розглядатися із врахуванням наступних драйверів [1, 3 – 7, 10, 13, 14].

Інтернет енергії. Нові конфігурації енергосистем у багатьох дослідженнях отримали назву Інтернет енергії (Internet of Energy, IoE). Енергетика нового покоління – це енергетика, де нове підключення до мережі можна отримати так само легко і швидко, як підключення до Інтернету – за принципом plug & play. З'являється можливість миттєво змінювати вимоги до надійності, зокрема, отримувати додаткову надійність чи продавати надлишковий резерв електроенергії, коли в ньому немає необхідності. Енергія має стати «мобільною» та бути доступною в будь-якій точці, як мобільний Інтернет.

Розосереджена енергія. Поняття дигіталізація в енергетичній сфері, як правило, розглядають у зв'язку з розосередженою енергетикою. Розосереджена енергетика активно розвивається в світі в останні роки, оскільки має місце суттєве здешевлення технологій. Проекти на меншу потужність в перерахунку на

кіловат-годину на всьому життєвому циклі стають все більш вигіднішими. До технологій розосередженої енергетики / розосереджених енергоресурсів (Distributed Energy Resources, DER) в світовій практиці відносять: розосереджену генерацію (Distributed Generation); керування попиту (Demand Response); керування енергоефективністю; мікромережі (Microgrids); розподілені системи зберігання електроенергії; електромобілі.

Якщо обсяги світового ринку технологій РГ в 2015 році, за оцінками компанії BCC Research, становили 65,8 млрд. дол., то прогнозується, що до 2021 року цей ринок зросте до 106 млрд. дол.

Промисловий Інтернет речей (Industrial Internet of Things – IIoT) – багаторівнева система, що включає датчики і контролери, встановлені на вузлах і агрегатах промислового об'єкта, засоби передачі даних та їх візуалізації, потужні аналітичні інструменти інтерпретації одержуваної інформації тощо.

Єдина інформаційна платформа. Для підвищення ефективності дигіталізації важливо використовувати всі інформаційні дані, які виробляє кожен об'єкт електроенергетики. Дигіталізація повинна зробити всі дані, які ще не використовуються на енергооб'єктах (до 98%), доступними для аналізу, щоб на їх підставі здійснити більш якісні та оперативні управлінські рішення. Першим кроком є формування єдиного протоколу представлення в енергосистемі даних всіма її учасниками, зокрема, при забезпеченні горизонтальної та вертикальної інтеграції потоків інформації, тобто формування єдиної цифрової платформи.

Орієнтація на ризик. У електроенергетиці важливо впровадити ризик-орієнтоване керування. Прикладом такого підходу до керування активами енергокомпаній є система прогнозування технічного стану обладнання (предикативна аналітика), що дозволяє спрогнозувати відхилення в роботі обладнання і запобігати аварійні ситуації. Системи прогнозування стану енергетичного устаткування перетворюють потік технологічної інформації у важливі для менеджменту відомості. Отримуючи дані в режимі онлайн, система за допомогою цифрового моделювання на базі інтелектуальних математичних алгоритмів виявляє небезпечні тенденції в момент їх зародження, за два-три місяці до аварії або поломки. Застосування технологій прогнозування не тільки підвищує надійність обладнання, але й дозволяє контролювати підприємств і власний персонал, аналізувати ефективність роботи установок.

Клієнтські сервіси. Цифровими клієнтськими сервісами можуть стати «інтелектуальні» контракти, системи інтерактивного обслуговування, різні пакети тарифів на оплату електроенергії. Прикладом такого клієнтського сервісу є підключення активних споживачів до балансування енергосистеми, зокрема, Demand Response.

Агрегатор попиту і пропозицій – організація, що забезпечує одночасне керування електроспоживачами обладнанням декількох споживачів і бере участь з їх сумарним обсягом споживання на оптовому ринку електроенергії, потужності і системних послуг [1, 4, 5]. Одна з першочергових завдань – створення умов для появи організацій-агрегаторів і інших сервісних організацій у сфері інтелектуальної енергетики. У світовій практиці останнім часом керування попиту стало повноцінним інструментом забезпечення балансу попиту та пропозиції в енергосистемах. Значний потенціал керування попиту зосереджений у середніх і малих споживачів роздрібного ринку, а також в побутовому секторі. Агрегатори – це учасники ринку електроенергії, керуючі зміною навантаження групи споживачів з метою продажу сукупності регульованих здібностей цих споживачів на оптовому ринку (також можливий продаж на ринку системних послуг). Агрегатори навантаження можуть бути незалежними компаніями або постачальниками електроенергії, тобто збутовими компаніями.

Нова роль такого суб'єкта ринку полягає в тому, що він формує пул споживачів, потенційно здатних без шкоди для свого технологічного циклу змінювати споживання, проводить оцінку наявних у споживачів можливостей розвантаження, розробляє ефективні алгоритми участі в програмах керування попиту, оснащує споживачів необхідними засобами автоматизації, приладами обліку та іншими пристроями. Для безпосередньої участі агрегаторів навантаження (у тому числі незалежних) у роботі оптового ринку розробляється відповідна нормативна документація

Саме у сфері систем керування функціонуванням і розвитком електроенергетики, відбуваються найбільш масштабні зміни, які в результаті мають привести до якісної трансформації умов енергопостачання споживачів за рахунок трьох базових компонент, характеристика яких наведена в табл. 1 [1, 6, 7, 8, 13]. Зважаючи на вище викладене, інтелектуальній електроенергетиці (побудованій згідно положень концепції Smart Grid) мають бути притаманними такі властивості [1, 6, 7]:

- мінімальні обмеження для інтеграції через загальну електричну мережу і загальний електричний режим будь-яких типів об'єктів виробництва, накопичення та споживання електроенергії, оптимального використання доступних джерел енергії на основі централізованої та розосередженої генерації;

- максимальна спостережуваність стану мережі та системи в цілому, гнучкість (адаптивність) функціонування і розвитку, прогнозування стану в умовах високої невизначеності режимів, зміни технологічної та просторової структури виробництва і споживання електроенергії під впливом технологічних та економічних (ринкових) чинників;

- орієнтованість на клієнта, тобто пріоритетність індивідуальних вимог споживачів до ефективності,

надійності та якості енергопостачання, що передбачає врахування їх інтересів і стратегій поведінки, активну участь у ринковій конкуренції, формування еластичного ринкового попиту на електроенергію, системні та мережеві послуги.

Таблиця 1 – Базові компоненти розвитку електроенергетики

Назва компоненти	Характеристика компоненти
Підвищення рівня автоматизації.	Забезпечує більшу оперативність реакції технічних пристроїв і систем, суб'єктів ринку на швидко змінювані зовнішні в темпі реального часу.
Підвищення рівня інформатизації.	Забезпечується за рахунок зростання обсягів і швидкості передачі даних, досягнення нового рівня в спостережливості і контролі стану, в керованості режимів роботи окремих технічних пристроїв і енергосистеми в цілому, в інформаційній прозорості механізмів конкурентного ринку для всіх його суб'єктів.
Підвищення інтелектуальності на всіх рівнях систем керування функціонуванням енергосистеми і ринковими операціями.	При нових рівнях інформатизації та автоматизації цей компонент забезпечує не тільки «реакцію по фактичному стану», а й «реакцію за прогнозом», виходячи з оцінки ймовірних змін виробничих параметрів окремих пристроїв, технічних систем, ринкової кон'юнктури.

Цінність побудови енергетичних систем на основі концепції Smart Grid полягає в тому, що підприємства електроенергетики зможуть «згладити» потреби в електроенергії у моменти максимального навантаження, відмовитися від використання гарячих резервів і знизити потребу в довгострокових капіталовкладень у створення додаткових генеруючих підприємств, а також скоротити необхідність інших інвестицій. Як приклад ключові елементи інтелектуальної електромережі згідно рекомендацій компанії Cisco зведено в табл. 2 [14]. Наявність чотирьох характеристик, наведених в табл. 2, разом узятих фактично робить енергосистему інтелектуальною.

Сьогодні пріоритетними постають наступні напрямки реалізації нової технологічної парадигми в енергетиці [1 – 7, 17 – 19]:

- 1) відкриті модульні цифрові платформи для організації кіберфізичних систем і середовищ в електроенергетиці;
- 2) інтелектуальні мультиагентні системи керування;
- 3) системи зберігання електроенергії (від акумуляторів для електромобілів і побутового сектора до систем зберігання електроенергії великої місткості, у т.ч. технології зберігання електроенергії у водневому циклі);
- 4) перспективна високовольтна і високочастотна силова електроніка;
- 5) технології «Інтернету речей» (цифрові датчики, сенсори, актуатори і засоби комунікації);
- 6) цифрові фінансові технології (блокчейн, смарт-контракти, децентралізовані автономні організації).

Таблиця 2 – Ключові елементи інтелектуальної електромережі згідно рекомендацій компанії Cisco

Елемент	Характеристика елемента
Прозорість роботи.	Повне уявлення про стан енергосистеми – передача даних лічильників, вимірювачів і команд керування.
Можливість керування.	Переведення енергосистеми у будь-який потрібний стан.
Автоматизація.	Швидка адаптація до змінних умов без втручання користувача.
Інтеграція.	Підключення систем і процесів підприємства електроенергетики – висока інтелектуальність і ефективність енергосистеми.

Проведений аналіз дозволив визначити базові складові сучасної технологічної платформи реалізації концепції Smart Grid:

- 1) силова електроніка (FACTS / HVDC);
- 2) системи керування енергоспоживанням (EMS);
- 3) автоматизація та захист «інтелектуальних» (цифрових) підстанцій;
- 4) інтегрований моніторинг стану підстанцій (ISCM);
- 5) комунікаційні рішення;
- 6) система керування розподілом / розподільними мережами (DMS);
- 7) автоматизація та захист розподілу / розподільними мережами енергії;

- 8) розосереджені енергетичні ресурси (DER);
- 9) система керування децентралізованою енергією (DEMS);
- 10) інтелектуальні датчики та лічильники Smart meter;
- 11) широка інтеграція ВДЕ в мережі та енергосистеми;
- 12) технічні рішення акумулювання (збереження) енергії.

СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПОТОКАМИ ЕНЕРГІЇ

В залежності від типу керованої мережі (Network Manager) – мережа передачі чи розподілу – можна виокремити системи керування передачею електроенергії (TMS) і системи керування розподілом електроенергії (DMS) [1, 11, 12, 16, 20]. До скасування державного регулювання системи керування енергоспоживанням (EMS) використовувалися, в основному, для комплексного керування виробництвом і передачею електроенергії. Після скасування державного регулювання поділ цих двох функцій призвело до створення систем керування виробництвом електроенергії (GMS) для незалежного керування генеруючими потужностями.

Компанія Newton-Evans опублікувала результат дослідження по застосуванню різних автоматизованих систем енергетичними компаніями з 25 країн світу [23]. Це масштабне дослідження проведено на підставі опитувань, що проводяться Newton-Evans з 1984 року. Згідно з результатами опитування, SCADA-системи експлуатують всі компанії, в той час як систему керування енергоспоживанням (EMS) є тільки в 74% опитаних компаній. Системи керування розподільними мережами (DMS) використовуються в 52% компаній, а системи керування відключеннями (OMS) – 62%. З точки зору застосовуваного обладнання впевнено лідирує компанія GE (включаючи Alstom Grid), слідом йдуть ABB і Siemens. У той час, як майже 2/3 опитаних компаній планують оновити свої SCADA-системи, 29% планують ввести в експлуатацію нові системи EMS і DMS.

Серед опитаних компаній 40% заявили, що розосереджені джерела енергії (DER) інтегровані в їх SCADA-системи, а 47% планують інтегрувати їх в найближчі кілька років. У Північній Америці 82% компаній планують в майбутньому інтегрувати DER в свої SCADA-системи, однак вони ще не впроваджені. Майже 34% опитаних компаній у світі вказали, що вони об'єднали в своїх системах функції SCADA / DMS і OMS. При цьому 28% не планують цього робити, як і половина північноамериканських компаній. В останні роки компанії стали приділяти більше уваги кібербезпеці. Більше половини респондентів використовують сервіси сторонніх компаній для кіберзахисту своїх об'єктів, а 48% вдаються до сторонньої допомоги для захисту критичної інфраструктури і оцінки вразливості. При цьому 23% компаній проявили інтерес до впровадження хмарних технологій на своїх об'єктах. Крім того, частка компаній, що використовують програмне забезпечення для збору даних про відключення збільшилася з 29% до 69% [23].

Системи керування розподільними мережами (distribution management system, DMS) і системи обробки відключень (outage management system, OMS) з плином часу зазнали схожі зміни, значною мірою завдяки розвитку обчислювальної техніки [1, 4, 5, 10, 16, 20]. Розвиток систем DMS починалося з доповнень до систем SCADA / EMS, адаптованих до рівня розподільних систем, а також з автономних систем. Відмінність таких систем від їх аналогів з магістральних мереж полягає в додаткових прикладних функціях, специфічних для розподільних мереж.

Цілі інтеграції систем SCADA / EMS з раніше незалежними засобами керування розподільними мережами та обробки відключень багатогранні. Рішення представляється у вигляді засобу, що забезпечує цілу низку функціональних удосконалень, які, в свою чергу, позитивно позначилися б на функціонуванні системи:

- інтегроване керування операціями (при збереженні всіх експлуатаційних даних в одній системі різними суб'єктами (наприклад, співробітники пункту управління, виїзний персонал, конструкторський відділ) можуть використовувати в роботі одне джерело даних);
- аналіз зв'язності (завдяки більш повного і глибокого аналізу керування великими і різномірними електричними мережами може бути більш точним, ефективним і безпечним);
- підвищена продуктивність праці (співробітники енергетичної компанії можуть витратити менше часу на збір інформації та більше – на її використання);
- інтеграція даних в масштабі підприємства (можуть бути вдосконалені інформаційні потоки між споживачами, відділом експлуатації, конструкторським відділом і керівництвом);
- миттєве охоплення стану мережі (енергетичні компанії можуть отримати набагато більш повне уявлення про стан системи в будь-який момент часу);
- оптимізація роботи мережі (система енергопостачання може експлуатуватися найбільш ефективним чином з технічної точки зору). Детально розглянемо особливості побудови децентралізованих систем керування енергією (Distributed Energy Management System, DEMS) {інше позначення: Distributed Energy Resource Management System (DERMS)} [1, 4, 5, 16, 20].

Таблиця 3 – Функції DEMS

№ з/п	Функція DEMS	Характеристика функції DEMS
1	Функція планування.	Розглядають на періоді часу від одного до семи днів з тимчасовим дозволом в залежності від розрахункового періоду продажу і покупки енергії, наприклад, 15, 30 або 60 хв. Функція прогнозу погоди DEMS забезпечує імпорт / розрахунок даних прогнозу погоди, які використовуються в якості вхідних даних для інших функціональних модулів DEMS. Функція прогнозу погоди має можливість імпорту прогнозу метеорологічних даних із зовнішніх джерел, наприклад, метеорологічних служб. За допомогою алгоритму корекції ковзним середнім мінімізується різниця відхилення між зовнішнім прогнозом і локально обмірюваними фактичними метеорологічними даними.
2	Функція прогнозу навантаження.	Забезпечує розрахунок для декількох класів навантаження. Основні дані – це безперервні історичні дані вимірюного навантаження з дозволом, відповідним функції планування.
3	Функція прогнозу генерації.	Обчислює очікувані обсяги генерації ВДЕ, в залежності від прогнозованих погодних умов. В якості алгоритму прогнозування використовується кусково-лінійне перетворення двох метеорологічних змінних в очікувану потужність згідно матриці перетворення (наприклад, швидкість і напрямок вітру для вітрових силових агрегатів, інтенсивності світла і температура навколишнього повітря для фотоелектричних систем). Матриця перетворення може бути налаштована відповідно до технічних специфікацій установки та / або оцінці на основі історичних свідчень потужності і метеорологічних вимірювань шляхом застосування нейромережевих алгоритмів (в кроці автономного аналізу).
4	Функція диспетчерських графіків.	Обчислює оптимізовані графіки (включаючи зобов'язання) для всіх установок, які адаптуються, таких як контракти, енергоблоки, сховища і гнучкі вимоги. Функція цілі полягає в різниці доходів за вирахуванням витрат, прибутку. Планування враховує параметри елементів моделі і їх топологічні зв'язки, які визначають фінансову інформацію, а також технічні, екологічні та договірні параметри і обмеження віртуальної електростанції.
5	Функція керування виробництвом електроенергії.	Передбачає контроль і нагляду за всіма генеруючими потужностями і обладнанням акумуляції VPP. Залежно від режиму керування відповідного блоку (незалежний, ручний, за розкладом або режим керування) і параметрів блоку (мінімальна / максимальна потужність, градієнт потужності, енергоємність), фактичного стану (в роботі, в очікуванні, віддалений запуск, дистанційне керування, збій) та фактичної потужності блоку, розраховуються команди на пуск / зупинка та уставки потужності для блоків, що передаються через командний інтерфейс.
6	Функція керування споживанням електроенергії.	Передбачає контроль і спостережуваність за всім гнучким навантаженням VPP. Клас гнучкого навантаження може містити один або кілька груп навантаження з однаковим пріоритетом, коли одна група навантаження може бути включена або виключена повністю за допомогою однієї комутаційної команди. Залежно від режиму керування класу навантаження (незалежний, за розкладом або в режимі керування) і фактичного комутаційного стану, стану фактичного елемента керування, фактичного енергоспоживання і допустимого часу керування груп навантаження, розраховуються необхідні команди на перемикання для забезпечення уставки загального навантаження і передається через командний інтерфейс (застосовується циклічне відключення навантаження групи навантаження одного класу).
7	Функція моніторингу енергообміну.	Обчислює очікуване відхилення узгодженого графіка обміну енергією в поточний обліковий період (15, 30 або 60 хв.) і значення необхідної корекції потужності для підтримки обміну за графіком. На основі фактичного енергоспоживання в поточному звітному періоді та фактичною тенденцією обміну потужності, в кінці звітного періоду розраховується передбачувана енергії обміну. Різниця між цим значенням і значенням узгодженого обміну, поділене на час, що залишився звітного періоду, дає значення необхідної загальної корекції потужності, яка необхідна для підтримки графіка узгодженого обміну в кінці розрахункового періоду. Це значення передається функції оптимізації і координаті в реальному часі для подальшої обробки.
8	Функція оптимізації в координації в реальному часі.	Відправляє загальне значення корекції енергії на всі окремі блоки генерації електроенергії, пристрої зберігання і гнучкі класи керованих навантажень.

Паралельно з лібералізацією енергетичних ринків, децентралізація виробництва електроенергії, тепла і холоду реалізуються в рамках концепції віртуальної електростанції (virtual power plant, VPP) [1, 4, 5, 16, 20]. VPP являє собою сукупність малих і дуже малих децентралізованих генераторів електроенергії,

контрольованих і керованих системою керування виробництвом і розподілом енергії більш високого рівня. Успішна робота VPP вимагає наступного технічного обладнання:

- 1) системи керування виробництвом і споживанням енергії, яка відстежує, планує і оптимізує роботи децентралізованих силових агрегатів;
- 2) системи прогнозування навантаження, яка здатна розраховувати дуже короткострокові (до 1 год.) і короткострокові прогнози (до 7 днів);
- 3) системи прогнозування виробництва ВДЕ з використанням прогнозу погоди, щоб передбачити продуктивність вітряних електростанцій і сонячних батарей;
- 4) системи керування енергетичними даними, яка збирає та архівує дані, які потрібні для оптимізації та прогнозування, наприклад, профілів виробництва і навантаження, а також контрактних даних для постачання споживача;
- 5) потужного інтерфейсу зв'язку системи керування виробництвом і споживанням енергії з децентралізованими силовими агрегатами.

Для функціонування VPP потрібний двонаправлений зв'язок між децентралізованими силовими агрегатами генерації електроенергії і центральною системою керування виробництвом і споживанням енергії.

Для операційного планування та складання диспетчерських графіків потрібні досить точні прогнози. Для параметрування прогнозу використовується кілька операційних показників, зокрема таких, як середня похибка прогнозу на добу або абсолютна похибка на добу або на періоді прогнозування. Залежно від основної мети VPP, вимоги до методів прогнозування можуть змінюватися. Якщо основна мета полягає у зниженні пікового навантаження або балансуванні енергії, прогноз повинен бути дуже точним у піковий час або час з високими цінами на балансуєчу енергію. Алгоритми прогнозування повинні вміти швидко пристосовуватися до нових ситуацій.

На основі результатів роботи алгоритмів прогнозу і фактичного стану VPP, навантаження у зоні відповідальності може забезпечуватися за допомогою децентралізованих силових агрегатів чи існуючих енергетичних контрактів.

Особливості роботи DEMS проаналізуємо на прикладі системи компанії Сіменс [20]. Система DEMS не призначена бути заміною для всього можливого устаткування автоматизації, необхідного для функціонування компонентів VPP. Повинно працювати, по крайній мірі, локальне устаткування автоматизації, яке буде реалізовувати основні операції децентралізованих силових агрегатів для забезпечення безпеки компонента і особистої безпеки під час відсутності системи DEMS.

Компоненти / блоки VPP і графік їх енергетичного потоку моделюються в DEMS в окремих класах елементів моделі, наприклад, конвертер одиниць, контракти, одиниць зберігання, відновлювані станції і гнучкі навантаження.

Додаток планування DEMS компанії Сіменс моделює всі витрати / доходи і потоки енергії та теплоносія з урахуванням обмежень, незалежно від їх типу (наприклад, електроенергію, гаряча вода, пар, охолодження, викиди, водень). Додатки керування DEMS забезпечують контроль і нагляд за потужністю всіх генераторів електроенергії, обладнанням зберігання і гнучким попитом, а також можливістю керування для підтримки узгодженого профілю обміну електроенергією.

Функції DEMS можна розділити на функції планування і функції керування. Наприклад, до відповідних функцій планування відносяться прогноз погоди, прогноз навантаження, прогноз виробництва та зобов'язання групи. DEMS забезпечує не тільки керування виробництвом і споживанням енергії, а також контроль, оптимізацію і координацію в реальному часі. Характеристика даних функцій наведена в табл. 3.

КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛОМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Система керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS) активно знижує піковий попит на електроенергію, оптимізує мережеві активи, одночасно допомагаючи розподільним мережам постачати електроенергію більш ефективно, надійно, безпечно та економно. Всі типи систем керування мережами використовують в якості базової платформи системи SCADA для диспетчерського керування та збору даних, функціонал яких сьогодні розширюється додатковими компонентами і додатками [1, 11, 12, 16, 20]. Спектр функцій для побудови систем керування виробництвом, передачею та розподілом електроенергії зведено в табл. 4 [7, 11, 12, 16, 20].

Має бути доступними також ще низка компонент функціонування системи, які використовуються і налаштовуються відповідно до завдань і розмірності системи керування. Характеристика таких компонент зведена у табл. 5.

Так, корпорація Oracle представила Oracle Utilities Network Management System, вдосконалену платформу керування мережами, яка дозволяє електромережевим компаніям здійснити перехід до клієнтоорієнтованої енергетичної мережі [22].

Платформа надає диспетчерам можливості для моніторингу стану всіх їх мережевих і лінійних активів у режимі реального часу. Платформа Oracle Utilities Network Management System дозволяє мережевим компаніям агрегувати інформацію про різні мережеві активи в єдиний інтерфейс з більш

детальним відображенням поточного функціонування мережі.

Таблиця 4 – Функції системи керування розподілом електроенергії

№ з/п	Функція	Характеристика функції
1	Керування техобслуговуванням та аварійними відключеннями.	Обробка звітів про аварійні відключення; планування і моніторинг перемикачів; корекція помилок.
2	Керування мережами передачі.	Оцінка стану; розрахунок потокорозподілу / струмів короткого замикання; аналіз наслідків аварій.
3	Керування розподільними мережами.	Ізоляція аварій та відновлення енергопостачання; розрахунок потокорозподілу / струмів короткого замикання; експертна система.
4	Керування даними про електроенергії.	Керування диспетчерським графіком; прогнозування навантаження / генерації; архівування; складання звітів.
5	Керування навантаженням.	Керування навантаженням для електроенергії та газу; керування навантаженням для водопостачання.
6	Керування для виробництва електроенергії.	Автоматичне керування виробництвом з регулюванням частоти і активної потужності; додатки планування.

Вперше мережеві компанії отримують інформацію про мережеві активи – двосторонню інформацію про розосереджені джерела енергії (Distributed Energy Resource, DER), інформацію про інфраструктуру інтелектуального обліку (Advanced Metering Infrastructure, AMI), дані систем керування розподілом потоків потужності в мережі (Distribution Management System, DMS) і дані систем керування аварійними відключеннями (Outage Management System, OMS) – у вигляді єдиного інтерфейсу для більш змістовного аналізу і прийняття обґрунтованих рішень.

Таблиця 5 – Компоненти, які використовуються і налаштовуються відповідно до завдань і розмірності системи керування

№ з/п	Компонента	Характеристика компоненти
1	Кооперативне керування системою з декількох розподілених центрів керування.	Забезпечує гнучку та динамічну роботу системи керування в розподіленій конфігурації.
2	Система архівної інформації.	Забезпечує архівування та подальше відновлення технологічних даних.
3	Прогнозування.	Забезпечують довгострокове, середньострокове і короткострокове прогнозування завантаження системи.
4	Планування потужності.	Забезпечує оптимальне планування ресурсів генеруючих потужностей, включаючи зобов'язання і плановані поставки.
5	Регулювання потужності.	Забезпечують моніторинг і контроль, тобто диспетчеризацію в реальному часі генеруючих потужностей, що беруть участь в регулюванні частоти.
6	Програми для мереж передачі.	Забезпечують швидкий комплексний аналіз і оптимізацію роботи передавальної мережі.
7	Керування відключеннями.	Забезпечує ефективне керування плановими і аварійними відключеннями в розподільних мережах.
8	Програми для розподільних мереж.	Забезпечують швидкий комплексний аналіз і оптимізацію роботи розподільчої мережі.
9	Програми експертної системи.	Підтримує оператора в важливих і складних завданнях у сфері усунення неполадок розподільній мережі.

Удосконалена платформа надає мережевим компаніям можливості моніторингу, які їм необхідні для відстеження та реагування на зміни стану мереж. Серед нових функцій розробленої Oracle галузевої платформи – мобільний інтерфейс, який дозволяє диспетчерам оперативно зв'язуватися і взаємодіяти з виїзними ремонтними бригадами, щоб прискорити усунення неполадок. Платформа містить функції безпеки, які попереджають диспетчерів про небезпечні роботи на розподільній мережі, викликаних функціонуванням РГ.

У Oracle Utilities Network Management System забезпечується повний моніторинг стану розподільної мережі за допомогою інфраструктури інтелектуального обліку, розподілених датчиків, геоінформаційної системи (GIS), системи диспетчеризації та збору даних (SCADA), датчиків стеження за погодними умовами та інших кінцевих пристроїв на єдиній платформі; масштабовану платформу, яка не обмежує мережеві компанії в їх подальшому розвитку; можливості для покращення показників надійності, зокрема, індексів

середньої тривалості переривання енергопостачання споживача (Customer Average Interruption Duration Index, CAIDI) та середньої тривалості переривань в роботі системи (System Average Interruption Duration Index, SAIDI) – навіть у процесі розвитку мереж; зниження витрат на відновлення енергопостачання, даючи можливість диспетчерам і виїзним ремонтним бригадам взаємодіяти у реальному часі за допомогою мобільного додатку, щоб оперативно усувати несправності; підтримку для операторів мереж газопостачання, водопостачання та електропостачання.

Нові функції Oracle Utilities Network Management System: покращені можливості оцінки збитку і керування в періоди несприятливих погодних умов, зокрема, визначення розрахункового часу відновлення (з метою більш точного інформування клієнтів); покращені можливості для диспетчера мережі в процесі підготовки системи енергопостачання до відключення на підставі знову отриманих даних від систем GIS, SCADA, AMI і систем стеження за погодними умовами; надання диспетчерам вдосконалених можливостей керування розподільними мережами, що покращують функції локалізації неполадок, перевантаження / відключення навантаження і профілювання навантаження.

Більш детально розглянемо особливості побудови та функціонування системи ETAP ADMS™, Розроблену компанією ETAP [16]. ETAP ADMS™ – це комбіноване рішення для планування та експлуатації при керуванні, контролі, візуалізації та оптимізації мережі розподілу електроенергії, що складається з:

- геопросторова інформаційна система (Geospatial Information System, GIS);
- електричні системи диспетчерського контролю та збору даних (Electrical Supervisory Control & Data Acquisition, eSCADA);

- система керування розподілом (Distribution Management System, DMS);
- розподілені мережеві додатки (Distribution Network Applications, DNA);
- система керування відключеннями (Outage Management System, OMS).

Характеристика системи керування розподілом електроенергії ETAP ADMS™:

- 1) масштабоване та модульне рішення для керування, контролю, візуалізації, оптимізації та автоматизації мереж розподілу від великих міст до сільських кооперативів;

- 2) інтегрована мережева модель для планування, захисту, надійності та операцій;

Інтуїтивно зрозумілий та зручний графічний інтерфейс користувача, який використовується операторами розподільної мережі (DNO), диспетчерами, інженерами по плануванню, аналітиками надійності та менеджерами;

- 3) розширена аналітика, включаючи оцінку стану розподілу, оптимізацію рівнів напруги та реактивної потужності, локалізація несправностей, відновлення ізоляції та відновлення обслуговування (FLISR), прогнозування відмов, прогнозування навантаження, уніфікований потік змінного та постійного струму, моделювання розосередженої генерації, захист, зниження навантажень тощо;

- 4) ситуаційна «інтелектуальність» забезпечує ефективний та надійний аналіз мережі та керування під час швидкої зміни стану мережі;

- 5) стандартизація з більшістю галузевих додатків та легка інтеграція із застарілим та стороннім програмним забезпеченням.

Система керування розподільними мережами ETAP ADMS™ являє собою інтелектуальне геопросторове рішення для розподільчих мереж, яке активно знижує пікове навантаження на систему, оптимізує мережеві активи, забезпечуючи значну ефективність передачі електричної енергії. Система керування розподілом побудована на існуючому та перевіреному рішенні ETAP Real-Time™ та інтегрується з GIS, eSCADA, OMS та іншими додатками, такими як автоматизоване зчитування вимірювань (Automated Meter Reading – AMR) та інформаційні системи клієнтів (Customer Information Systems – CIS). DMS надають розширені можливості підтримки прийняття рішень для безпечної та надійної роботи радіальних та замкнених розподільних мереж розподілу. Основні характеристики особливостей призначення ETAP ADMS наведені в табл. 6.

Наведемо характеристику окремих модулів ETAP ADMS™ [16].

1. Геопросторові електричні схеми

Модуль Геопросторові електричні схеми ETAP забезпечує редаговане середовище для електричних компонентів і з'єднань в поєднанні з геопросторовими даними. Геопросторові дані можуть бути імпортовані з багатьох систем сторонніх виробників або можуть бути змодельовані безпосередньо в геопросторових електричних схемах. Переваги електричних схем географічних інформаційних систем (ГІС): скорочення витрат на введення даних за допомогою ГІС-оновлених технічних даних для системних досліджень; автоматична корекція помилок напруги і струму дозволяє уникнути дублювання / неправильного введення даних; автоматичне створення баз даних електричного обладнання в оптимізованій базі даних; повний контроль результатів аналізу, що відображаються на схемі електричної схеми ГІС; гнучкість у використанні карт в якості фонових зображень для просторового інформування; гнучке використання всіх ETAP модулів для аналізу; багаторівневе графічне відображення даних ГІС та ETAP.

Таблиця 6 – Основні характеристики особливостей призначення ETAP ADMS

№ з/п	Призначення	Особливості
1	Мережевий зв'язок та аналіз топології.	Постійна обробка електричної топології системи на основі умов роботи в режимі реального часу.
2	Оцінка стану розподілу.	Висока оцінка стану продуктивності дистрибуції та нетехнічні розрахунки збитків, що зумовлюють незбалансований характер роботи розподільної мережі, а також зростаюче проникнення розосередженої генерації до розподільних мереж електроживлення.
3	Послідовність перемикачів та керування замовленими перемикачними.	Запит, побудова, перевірка, затвердження повного плану послідовностей комутації та виконання його «в один крок». Розширені можливості моделювання та прогнозування для незбалансованих мережевих фідерів із вбудованою логікою та процедурами керування системою.
4	Балансування подачі та мінімізація втрат.	Оптимізація розподілених перемикачів автоматично визначає оптимальну топологію системи для збалансування завантаження подачі та / або поєднання з мінімізацією втрат для усунення ненормальних умов роботи. Він забезпечує оптимальний стан існуючих комутаційних пристроїв і пропонує розташування нових відкритих точок зв'язку в системі.
5	Оптимізація напруги / реактивної потужності та консервативне зниження напруги.	ETAP VVO оптимально керує загальносистемними рівнями напруги та потоком реактивної потужності для досягнення ефективної роботи розподільної мережі, а також допомагає операторам розподілу зменшити втрати в системі, піковий попит або споживання енергії за допомогою методів CVR.
6	Локалізація несправностей, відновлення ізоляції та відновлення обслуговування.	ETAP FLISR знаходить ділянку мережі, яка буде ізольована через вимушене відключення, та надає інформацію оператору чи диспетчеру щодо замовника. FLISR має вирішальне значення для прийняття рішень в надзвичайних умовах і забезпечує спостережуваність надійності постачання.

2. Оцінка стану розподільної мережі

Здійснюється розрахунок несиметричного розподілу навантаження і нетехнічних втрат. У зв'язку з проникненням розосередженої генерації в розподільну мережу контроль мережі на підставі моделі реального часу з оцінкою стану розподілу відіграє основну роль в традиційних несиметричних розподільних мережах. Функція оцінки стану розподільної мережі використовує методи розподілу навантаження для видачі в реальному часі інформації про технічні та нетехнічні втрати.

Основні можливості оцінки стану розподільної мережі: оцінка індивідуальних навантажень на фідер з урахуванням класів навантаження, типу навантаження, кривої навантаження і вимірювань навантаження; інтегрованість з оцінкою стану ліній електропередач, надаючи уніфіковану і повну картину комплексної системи передачі і розподілу електроенергії;

Функція оцінки стану розподільної мережі може працювати в енергетичних мережах в режимах: з перевіркою або без перевірки телеметричних вимірювань; з ручною або автоматичною обробкою неспостережуваних частин мережі; з фіксованими вимірами або без них. Ця функція використовує архівні дані мережі, включаючи: денні профілі навантаження, що враховують типи, класи, дні тижня і погодні умови; пікові навантаження для розподільних трансформаторів і / або споживачів і / або ліній передачі. Вона враховує відсутність даних в режимі реального часу і компенсує їх історичними даними, псевдо- і віртуальними вимірами для отримання мінімального набору вхідних даних, необхідних для узгодженого розрахунку усталеного режиму.

3. Ізоляція коротких замикань і відновлення роботи

Модуль здійснює оптимальне відновлення роботи мережі. Модуль ETAP для виявлення коротких замикань і відновлення роботи знаходить ділянку мережі, який буде ізольований через вимушений відключення, і надасть інформацію оператору або планувальником щодо порушених споживачів. Даний модуль може визначити оптимальну стратегію відновлення, яка буде використовуватися для відновлення максимальної кількості порушених споживачів без повторного виникнення несправності і перевантаження існуючих мереж.

4. Переключення системи керування замовленнями

Керування замовленнями на перемикач ETAP (SOM) дозволяє диспетчерам енергосистеми, операторам та менеджерам запитувати, призначати, відстежувати та записувати робочі замовлення на комутацію. Використовуючи технологію на основі HTML5 для зв'язку з мобільними додатками, ETAP SOM з'єднує бригади з обслуговування та відключення роботи з центром керування для повного керування запланованими заходами в цій галузі.

5. Оптимізація комутації

Здійснюється балансування фідерів і мінімізація втрат. Модуль оптимізації послідовності перемикачів – це засіб, який автоматично визначає оптимальну конфігурацію системи для досягнення однієї або декількох цілей, поставлених користувачем. Він визначає оптимальний стан існуючих комутаційних пристроїв і рекомендує місця для установки нових точок секціонування системи. Модуль може використовуватися інженерами-проектувальниками або інженерами експлуатації для мінімізації втрат активної потужності в системі і пом'якшення або повного усунення аномальних умов експлуатації. Цей інструмент може застосовуватися для аналізу радіальних і петльових трифазних або однофазних енергосистем великої розмірності з різними типами профілів навантаження.

6. Блок контролю кількості спрацьовувань

Здійснюється планування технічного обслуговування обладнання на підставі контролю кількості спрацьовувань. Блок контролю спрацьовувань відстежує кількість спрацьовувань, виконаних кожним вимикачем, вимикачем конденсатора, пристроєм РПН, електроприводним ізолятором, вимикачами навантаження тощо, які контролюються системою.

7. Аналіз структури мережі

Здійснюється аналіз структури мережі в режимі реального часу та обробка топології мережі. Додатки Smart Grid для керування і автоматизації розподільних мереж базуються на точній моделі стану мережі. Модуль аналізу структури мережі в Real-Time (NCA) обраховує стан в реальному часі. Щоб оцінити і проаналізувати стан всієї електричної мережі, топологія мережі повинна бути доступна і постійно оновлюватися в режимі реального часу. Обробка топології мережі постійно зберігає і оновлює топологію електричної системи, таку як імпеданс ліній, навантаження, підключення, стан вимикачів тощо. Обробка топології мережі ETAP є основою для додатків реального часу, наприклад, оцінки стану розподільної мережі. Обробка топології мережі також забезпечує динамічний аналіз топології електричної мережі і повідомляє про умови експлуатації оператору. Дисплеї зі значними можливостями забезпечують швидку індикацію відключених споживачів та інших аномальних умов роботи мережі.

8. Інтелектуальний онлайн аналіз

Інтелектуальний онлайн аналіз є потужним аналітичним інструментом, який дозволяє прогнозувати поведінку системи у відповідь на дії оператора та події на підставі збережених даних і даних, що надходять в режимі реального часу.

Основні можливості функції інтелектуального моделювання: моделювання спрацьовування вимикача; визначення потенційних проблем в експлуатації; моделювання пуску двигуна і зміни навантаження; прогнозування часу роботи захисних пристроїв; прогнозування відгуку системи на дії оператора; реалізація сценаріїв «що – якщо»; моделювання на підставі архівних даних і даних, які надходять в реальному часі; допомога та навчання оператора. Використовується предиктивне моделювання, яке дозволяє уникнути непередбачених відключень підприємства, пов'язаних з людським фактором, перевантаженням обладнання тощо. Предиктивне моделювання надає середовище для ефективного навчання та підтримки операторів.

9. Оптимізація Вольт/ВАр (VVO) і консервативне зниження напруги (CVR)

Здійснюється мінімізація реактивних втрат і підвищення ефективності розподільчої мережі. Оптимізація Вольт/ВАр (VVO) керує рівнями напруги по всій мережі і реактивною потужністю при розрахунку усталеного режиму для досягнення ефективної роботи розподільної мережі. VVO допомагає диспетчерам розподілу знизити втрати системи, піковий попит або споживання енергії за допомогою методів зменшення напруги (CVR).

Оптимізація і Вольт/ВАр керування є функцією, яка визначає кращий набір контрольних дій для всіх пристроїв регулювання напруги і реактивної потужності для досягнення однієї або декількох зазначених робочих цілей без порушення будь-якого з основних експлуатаційних обмежень (межі високого / низького напруги, межі навантаження тощо). Оптимізація Вольт/ВАр включає функцію консервативного зниження напруги (CVR), яка використовується для розрахунку і підтримки допустимого напруги (наприклад, 220 В +/- 5%) на вході для всіх клієнтів, що обслуговуються фідером при всіх можливих умовах експлуатації. CVR використовується для вирівнювання профілів напруги і зниження загальної напруги системи під час перевищення заданих рівнів напруги згідно вимог ANSI або IEC. Загальна система попиту може бути знижена на коефіцієнт 0,7–1,0% на кожен 1% зниження напруги.

10. Керування послідовністю перемикачів

Модуль аналізу ETAP ArcFault™ обчислює обсяги енергії переключень для систем передачі і розподілу електроенергії. Конструктор послідовності перемикачів містить перелік комутаційних пристроїв і часи роботи вимикачів, роз'єднувачів навантаження і роз'єднувачів заземлення. Перед початком процесу моделювання будь-якої послідовності перемикачів додаток перевіряє відповідність послідовності безпечним процедурам перемикачів і запитує підтвердження в процесі моделювання кожного етапу перед переходом до наступного етапу, щоб уникнути випадкового перемикачів.

11. Аналіз прогнозу навантаження (контроль, прогнозування, керування)

Прогнозування навантаження є ідеальним інструментом для промислових підприємств, а також елементом для надійного і точного прогнозування майбутньої короткострокової навантаження в системі. Основні переваги прогнозування навантаження: адаптивне прогнозування навантаження шини; тренди в реальному часі; бібліотека профілів навантаження; архівація сценаріїв прогнозування; прогнозування завантаження до семи днів; прогнозування декількох графіків (режимів) навантажень; змінні користувачем погодні змінні і навантажувальні профілі; перегляд прогнозів на основі навантажувальних і погодних умов; бібліотеки профілів навантажень; імпорт і експорт даних з попередніх прогнозів.

12. SCADA & Monitoring для електричних мереж

SCADA & Monitoring, керований моделлю, забезпечує інтуїтивну візуалізацію і аналіз в реальному часі за допомогою інтелектуального графічного призначеного для користувача інтерфейсу, однолінійних схем, геопросторового вигляду та цифрових панелей моніторингу.

13. Система керування аварійними відключеннями

Інтегроване керування аварійними відключеннями і рішення для керування ремонтними бригадами, яке мінімізує збої в роботі з відключенням, забезпечуючи більш швидке виявлення і швидке відновлення завдяки розширеній ситуаційної обізнаності, автоматизації, а також ефективному і високоефективному використанню ремонтних бригад.

14. Моніторинг енергоспоживання та симуляторних процесів

Модуль моніторингу та моделювання електричних мереж ETAP (PSMST[™]) лежить в основі системи керування електроспоживанням в реальному часі ETAP. Складові моніторингу енергоспоживання та розрахунку процесів: інтелектуальний моніторинг; інтуїтивний, інтелектуальний і інтегрований моніторинг в режимі реального часу з сучасним інтерфейсом; предиктивне моделювання; прогнозування поведінки системи у відповідь на дії оператора та події на підставі збережених даних і даних, що надходять в режимі реального часу; первинний енергооблік; детальне споживання енергії та аналіз витрат на основі тарифів на енергоносії і обміну інформацією про ринок електроенергії; прогнозування навантаження; прогнозування навантаження і передбачення трендів системи на основі алгоритмів, які адаптуються до вхідних змінних, зокрема, погодні умови.

Іншим прикладом ефективною реалізації ADMS для керування розподільними мережами є рішення компанії Schneider Electric (система SE ADMS) [12].

Ключовою особливістю системи SE ADMS є повна інтеграція п'яти абсолютно синхронізованих між собою систем на базі єдиної інформаційної платформи з єдиним призначенням для користувача інтерфейсом: системи керування розподілом енергії (Distribution Management System, DMS), системи керування аварійними і плановими відключеннями (Outage Management System, OMS), системи аналізу режимів роботи мереж високої напруги (Energy Management System, EMS) і системи диспетчерського керування та збору даних (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA OASyS), геоінформаційної системи GIS (Geographic information system, GIS) [12].

При побудові системи використовується сервіс-орієнтований (Service-oriented Architecture, SOA) підхід, який полягає в модульній побудові самого програмного забезпечення, заснованого на використанні розподілених, змінних компонентах, оснащених стандартизованими інтерфейсами для взаємодії за стандартизованими протоколами. Даний підхід забезпечує підтримку кількох систем (технологічної системи, система діагностики, системи збору даних, навчальної системи та системи резервного копіювання), що працюють паралельно, де кожна система складається з набору сервісів, необхідних для успішної роботи всієї системи в цілому.

Важливим архітектурним аспектом є масштабованість системи. Систему SE ADMS можна розглядати в якості одного з основних блоків середовища інтелектуальних мереж, що надає послуги інтеграції на основі стандартів (наприклад, веб-сервіси), для забезпечення обміну даних з іншими корпоративними системами підприємства, такими як геоінформаційна система (Geographic information system, GIS), система інформації про споживачів (Customer Management System, CIS), система планування ресурсів підприємства (Enterprise Resource Planning, ERP), вдосконалена система вимірювання, збору і аналізу даних (Advanced Measurement Infrastructure, AMI) та інші.

Основними особливостями системи SE ADMS з функціональної і архітектурної точки зору є: масштабованість; висока продуктивність; безпека (система розроблена на безпечному міжплатформенному програмному забезпеченні); підтримка різних версій схеми мережі і графічних даних (даних відображення); можливість реалізації розподіленої архітектури; підтримка інтерфейсів на базі стандартів IEC 61970 та IEC +61968, які підходять для сценаріїв інтеграції на основі сервіс-орієнтованої архітектури; забезпечення повноцінного функціоналу архівування даних, тобто можливості зберігання, як телеметричних даних, так і результатів обчислень функцій DMS з аналізом трендів.

Система SE ADMS складається з трьох основних системних компонентів (підсистем) [12]: додатків графічного інтерфейсу користувача (Graphical User Interface – GUI) на рівні уявлення; додатків системи керування розподілом енергії (Distribution Management System – DMS) і служби реального часу розподіленої

системи диспетчерського керування та збору даних (Distributed Supervisory Control and Data Acquisition – DSCADA) на прикладному рівні; служб архівування на рівні бази даних.

Характеристики базових функцій SE ADMS зведені в табл 7.

Таблиця 7 – Характеристики базових функцій SE ADMS

№ з/п	Базова функція	Характеристика базової функції
1	Керування роботою мережі.	Відновлення електропостачання, відновлення електропостачання на великих ділянках, керування послідовністю перемикачів, керування відключеннями, показники роботи мережі, скидання навантаження, часові елементи, тренажер диспетчера.
2	Планування та оптимізація.	Регулювання реактивної потужності, регулювання напруг, реконфігурація мережі, оперативне прогнозування навантаження, короткотермінове прогнозування навантаження, керування навантаженням, покращення параспроможності мережі.
3	Аналіз роботи мережі.	Розрахунок втрат, аналіз надійності, розрахунок струмів короткого замикання, перевірка характеристик вимикача, гармонійний аналіз, аналіз історії роботи системи.
4	Планування розвитку мережі.	Прогнозування навантаження, планування розвитку мережі, автоматизація мережі, оптимальне розміщення регуляторів напруги, підвищення надійності мережі.

Функції «керування роботою мережі» і «планування та оптимізація» в системі SE ADMS здійснюються в режимі реального часу, тоді як функції «аналіз роботи мережі» і «планування розвитку мережі» можуть здійснюватися в автономному режимі.

Отже, сучасні системи керування генерацією та розподілом електроенергії включають в себе набір засобів, що дозволяють операторам енергокомпаній не тільки ефективно керувати, але й виявляти, запобігати або усувати збурення в системі / мережі перш, ніж вони переростуть в масштабні аварії. Наступний етап у розвитку засобів контролю і керування для енергосистем – це реалізація групи технологій, відомих в цілому під назвою систем глобального моніторингу (WAMS, Wide Area Monitoring Systems) [1, 6, 10, 11, 20]. Вони не призначені для заміни систем SCADA / EMS / DMS або будь-яких інших прикладних систем, а скоріше служать доповненням до них. У WAMS застосовуються фазорні вимірювальні блоки, які синхронно у часі реєструють з високою точністю (до однієї мікросекунди) параметри мережі в найважливіших точках, розподілених по дуже великій площі. Системи WAMS можна розглядати як «міст» між великими ділянками мережі, аналогічний тому мосту, який будують між магістральними та розподільними мережами інтегровані системи класу Network Manager. Наприклад, компанія АББ вже почала розгортання WAMS на рівні електричних розподільних мереж. У найближчі роки WAMS, ймовірно, стануть невід'ємним елементом диспетчерських залів електричних мереж, а в подальшому – повністю інтегрованим елементом систем керування мережами.

ВИСНОВКИ

1. На сьогодні ми можемо констатувати поєднання трьох сегментів ринку: надійні та гнучкі мережі, інтелектуальна розосереджена енергетика і споживчі сервіси. А власне Smart Grid має розглядатися як інтегрована безпечна і надійна електроенергетична система, що охоплює генерацію, транспорт, розподіл та кінцеве споживання електричної енергії, ефективність якої забезпечується оперативним обліком енергоданих і ґрунтується на застосуванні передових засобів моніторингу, комунікації, аналізу та динамічного керування. Smart Grid набагато ширше, ніж технології чи комплекси технічних засобів, автоматизація системи чи розробка програмного продукту

2. Реалізація концепції Smart Grid неможлива без масштабного фізичного оновлення генеруючого і мережевого устаткування, забезпечивши керування технологічними процесами та економічними взаємодіями від локального до національного рівня. Саме у сфері систем керування функціонуванням і розвитком електроенергетики, відбуваються найбільш масштабні зміни, які в результаті мають привести до якісної трансформації умов енергопостачання споживачів за рахунок підвищення рівнів автоматизації, інформатизації та інтелектуальності на всіх рівнях систем керування функціонуванням енергосистеми і ринковими операціями.

3. Вдосконалена система керування розподільними мережами (ADMS) – з передовим аналізом системи DMS для оптимізації роботи мереж в поєднанні з перевіреною на практиці системою SCADA для контролю і керування, системою EMS для роботи з мережами живлення, а також вбудованою системою

керування аварійними відключеннями для підвищеної відмовостійкості і надійності – надає електроенергетичним компаніям модульну і гнучку платформу, яка використовує стандартний інтерфейс, модель даних, інтеграційну мережу і захищену інфраструктуру.

4. Особливості реалізації складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами розглянуто на прикладі побудови децентралізованих систем керування енергією (Distributed Energy Management System, DEMS), де здійснюється контроль і моніторинг потужності всіх генераторів електроенергії, обладнання зберігання і гнучким попитом, а також можливістю керування для підтримки узгодженого профілю обміну електроенергією, а також систем керування розподілом електроенергії (Distribution Management System, DMS), в яких забезпечується зниження пікового навантаження на систему, оптимізація мережових активів, значну ефективність передачі та використання електричної енергії.

Список використаної літератури

1. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Денисюк С.П. та інш. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими / За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
2. Денисюк С.П. Енергетичний перехід – вимоги до якісних змін у розвитку енергетики // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 1. – С. 7–28.
3. Денисюк С.П. Технологічні орієнтири реалізації концепції Smart Grid в електроенергетичних системах // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2014. – № 1(35). – С. 7–21.
4. Денисюк С.П., Соколовський П.В. Аналіз функціонування гнучкої генерації на етапі переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid // Електрифікація транспорту. – 2018. – № 15. – С. 31–42.
5. Денисюк С.П., Таргонський В.А., Артем'єв М.В. Локальні електроенергетичні системи з активним споживачем: методи побудови та алгоритми їх функціонування // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2018. – № 3. – С. 7–22.
6. Интеллектуальные электроэнергетические системы: элементы и режимы // Кириленко О.В., Блинов И.В., Денисюк С.П. и др. / Под общ. ред. А.В. Кириленко. – К.: ИЭД НАН Украины, 2014. – 408 с.
7. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2014. – № 9 (том 2). – С. 82–94.
8. Мартынова А. Электроэнергетика 4.0: перейти на цифры // <http://atomicexpert.com/electricenergy40>.
9. Олійник Д.І. Міжнародний досвід фінансування сталого розвитку громад (на прикладі формування мережевої інфраструктури): аналіт. доповідь / Олійник Д.І. – К.: НІСД, 2017. – 48 с.
10. Орн М., Сен А. Сближение диспетчерских систем. Интеграция систем управления магистральными и распределительными сетями и систем обработки отключений // АББ Ревю 4/2005. – С. 30–32.
11. Решение АББ для распределительных цепей. – Каталог АББ, 2012. – 108 с.
12. Система SE ADMS – решение Schneider Electric для управления распределительными сетями. Техническое описание системы (Obzor-reshenia-ADMS-ot-shneider-electric-final DMS).
13. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Розвиток інтелектуальних електричних мереж України на основі положень концепції Smart Grid // Зб. «Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. випуск». – 2013, ІЕД НАНУ. – С. 5–12.
14. Типс Б., Тафт Дж. Концепция Cisco Smart Grid: Решения по автоматизации подстанций для диспетчерских служб. – Корпорация Cisco, 2010. – 9 с. (https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf)
15. Цифровой переход в электроэнергетике России // Под общей редакцией В.Н. Княгинина и Д.В. Холкина; Москва, сентябрь 2017. – 47 с.
16. ADMS Advanced Distribution Management System Grid Modernization Redefined. Integrated Distribution Planning, eSCADA, DMS & OMS Solution 2017 ETAP / Operation Technology, Inc. B12-ETAPADMS-JAN2017 info@etap.com
17. Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011. – P. 455-473.
18. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №4(46). – С.7–17.
19. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks // Strzelecki R. und Benysek G. – Springer, 2010. – 414 p.
20. Siemens Energy Sector. Справочник по энергетике // Издание 7.0 Управление электроэнергией 7.2 Продукты и решения в области управления электроэнергией (<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab5c1a35b3afe58903c604058a2aacb9cce464e6/version:1519821054/peg-part07-ru.pdf>)
22. Гнучкість та інтеграція відновлюваних джерел енергії [Електронний ресурс]. – Режим доступу до

ресурсу: https://biz.censor.net.ua/columns/3131737/gnuchkst_ta_ntegratsiya_vdnovlyuvanih_djerel_energ

23.[Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: https://docs.oracle.com/cd/E76909_03/PDF/NMS_V2_3_0_2_Configuration_Guide.pdf

24. Світ передачі та розповсюдження - нова стаття Чака Ньютона [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: <https://newton-evans.com>

25. Гнучкість та інтеграція відновлюваних джерел енергії [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: <https://lawmsb.com.ua/hnuchkist-ta-intehratsiia-vidnovliuvanykh-dzherel-enerhii/>

S. Denysiuk, Dr. Sc. Sciences., Prof. **ORCID** 0000-0002-6299-3680
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
R. Strzelecki, Dr. Sc. Sciences., Prof. **ORCID** 0000-0001-9437-9450
Gdańsk University of Technology, Gdańsk

FORMATION OF COMPONENTS OF SMART PLATFORM FOR THE MANAGEMENT OF POWER SYSTEMS AND NETWORKS

Features of implementation of the Smart Grid concept in modern energy systems and networks with consideration of modern energy drivers, in particular, Internet energy, Internet of things, dispersed generation, development of customer services and aggregators of demand and supply for electricity, are considered. The basic components of the development of the electric power industry have been evaluated taking into account the requirements of energy transition, digitalization of the economy, in particular, business applications and information and communication systems. The elements of the modern technology platform Smart Grid are given. An assessment of the peculiarities of the formation of an intelligent platform for the management of energy systems and electric networks for individual energy companies is given.

Features of construction of the Distributed Energy Management System (DEMS) are considered in detail. Features of DEMS are analyzed on the example of DEMS by Siemens. The planning and management functions of DEMS are considered. It is shown that DEMS controls provide control and monitoring of the power of all power generators, storage equipment, and flexible demand, as well as the ability to control to maintain a consistent electricity exchange profile.

The basic functions of the Distribution Management System (DMS) are presented. The control systems developed by Oracle, ETAP and Schneider Electric have been analyzed as components of the customer-oriented power distribution management platform. Here is a description of the individual ETAP ADMS modules and the basic SE ADMS features developed by ETAP and Schneider Electric, respectively.

Keywords: Smart Grid, power systems, power grids, intelligent control, decentralized power management systems, power distribution control systems.

REFERENCES

1. Bazyuk T., Blinov I., Butkevich O., Denysiuk S. et al. Intelligent Power Networks: Elements and Modes / By ed. acad. NAS of Ukraine O. Kyrylenko. – K.: IED of NAS of Ukraine, 2016. – 400 p.
2. Denysiuk S. Energy transition – requirements for quality changes in energy sector development // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2019. – № 1. – p. 7–28.
3. Denysiuk S. Technological guidelines for the implementation of the Smart Grid concept in power systems // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2014. – № 1(35). – p. 7–21.
4. Denysiuk S., Sokolovskyi P. Analysis of the variable generation function on the step of transition to intellectual networks Smart Grid // Electrification of transport. – 2018. – № 15. – p. 31–42.
5. Denysiuk S., Tarhonskyi V., Artemiev M. Local electrical energy systems with active consumer: methods of construction and algorithm of their functioning // Power engineering: economics, technique, ecology. – 2018. – № 3. – p. 7–22.
6. Intelligent electric power systems: elements and modes // Kyrylenko O., Blinov I., Denysiuk S. et al. / Ed. A. Kyrylenko. – K.: IED NAS of Ukraine, 2014. – 408 p.
7. Kyrylenko O., Denysiuk S. Current tendencies of construction and control of modes of electric power networks // Energy saving. Energy. Energy audit. – 2014. – No. 9 (Volume 2). – p. 82–94.
8. Martynova A. Electricity 4.0: switch to digital // <http://atomicexpert.com/electricenergy4.0>.
9. Oliynyk D. International experience in financing sustainable community development (for example, network infrastructure development): an analyst. report / Oliynyk D. – K.: NISD, 2017. – 48 p.
10. Orn M., Sen A. Approximation of control systems. Integration of backbone and distribution network management systems and shutdown processing systems // ABB Review 4/2005. – p. 30–32.

11. ABB solution for distribution circuits. – ABB catalog, 2012. – 108 p.
12. SE ADMS is a Schneider Electric solution for managing distribution networks. System Technical Description (Obzor-reshenia-ADMS-ot-shneider-electric-final DMS).
13. Stogniy B., Kyrylenko O., Denysiuk S. Development of Intelligent Electric Networks of Ukraine Based on the Provisions of the Smart Grid Concept // Coll. «Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Spec. output". – 2013, IED of NASU. – p. 5–12.
14. Tips B., Taft J. Cisco Smart Grid Concept: Substation Automation Solutions for Dispatch Services. – Cisco Corporation, 2010. – 9 p. (https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/citizenship/environment/docs/sGrid_qa_c67_532319.pdf)
15. The digital transition in the electric power industry of Russia // Under the general editorship of V. Knyagin and D. Chalkin; Moscow, September 2017. – 47 c.
16. ADMS Advanced Distribution Management System Grid Modernization Redefined. Integrated Distribution Planning, eSCADA, DMS & OMS Solution 2017 ETAP / Operation Technology, Inc. B12-ETAPADMS-JAN2017 info@etap.com
17. Benysek G., Kazmierkowski M.P., Popczyk J., Strzelecki R. Power electronic systems as a crucial part of Smart Grid infrastructure – a survey // Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences, Vol. 59, No. 4, 2011. – p. 455-473.
18. Denysiuk S., Strzelecki R., Opryshko V. The smart grid concept implementation by expanding the use of demand side management and modern power electronic installations // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – №4(46). – p.7–17.
19. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks // Strzelecki R. und Benysek G. – Springer, 2010. – 414 p.
20. Siemens Energy Sector. Energy Reference // Edition 7.0 Electricity Management 7.2 Products and Solutions in the Field of Electricity Management (<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ab5c1a35b3afe58903c604058a2aacb9cce464e6/version:1519821054/peg-part07-ru.pdf>)
22. Flexibility and integration of renewable energy sources [Electronic resource] .- Mode of access to the resource: https://biz.censor.net.ua/columns/3131737/gnuchkst_ta_ntegratsya_vdnovlyuvanih_djerel_energ
23. [Electronic resource] .- Mode of access to the resource: https://docs.oracle.com/cd/E76909_03/PDF/NMS_V2_3_0_2_Configuration_Guide.pdf
24. Transmission & Distribution World – New Article by Chuck Newton. Grid Modernization from an Energy Policy Perspective in 2019[Electronic resource] .- Mode of access to the resource: <https://newton-evans.com>
25. Flexibility and integration of renewable energy sources [Electronic resource] .- Mode of access to the resource: <https://lawmsb.com.ua/hnuchkist-ta-intehratsiia-vidnovliuvanykh-dzherel-enerhii/>

Надійшла 21.10.2019

Received 21.10.2019